



(19) BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENT- UND  
MARKENAMT

(12) **Offenlegungsschrift**  
(10) **DE 102 00 680 A 1**

(51) Int. Cl. 7:  
**G 05 B 19/41**  
B 25 J 9/16  
G 05 B 19/416

(21) Aktenzeichen: 102 00 680.6  
(22) Anmeldetag: 10. 1. 2002  
(43) Offenlegungstag: 7. 8. 2003

**DE 102 00 680 A 1**

(71) Anmelder:  
Siemens AG, 80333 München, DE

(72) Erfinder:  
Hamann, Jens, Dr., 90765 Fürth, DE; Ladra, Uwe,  
06110 Halle, DE; Schäfers, Elmar, Dr., 90419  
Nürnberg, DE

(56) Entgegenhaltungen:  

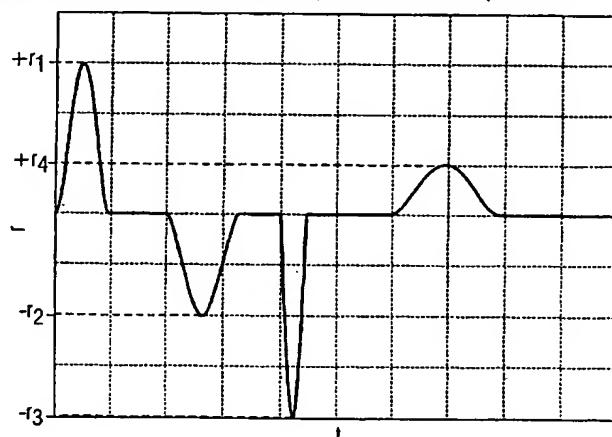
DE	101 18 477 A1
DE	39 38 083
US	53 31 264 A
EP	07 68 587 A1
EP	06 85 779 A1
WO	96 12 992 A1
WO	00 42 479 A1

**Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen**

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

(54) Minimale Schwingungsanregung beim Verfahren mit Ruckbegrenzung durch Adaption von Ruckprofilen

(57) Zur Verbesserung der Schwingungsanregung kann man erfindungsgemäß einerseits durch die Verrundung des Ruckverlaufs generell eine bessere Filterwirkung erreichen und andererseits zusätzlich durch unterschiedliche Ruckwerte ( $r_1$  bis  $r_4$ ) die Bandsperren eines ruckäquivalenten Filters gezielt auf die Eigenfrequenzen eines mechanischen Systems abstimmen, so dass die Filterwirkung noch verstärkt wird. Beide Maßnahmen können auch beliebig miteinander kombiniert werden, womit die Wirkung, möglichst wenig schwingungsanregend zu positionieren, verstärkt wird.



**DE 102 00 680 A 1**

## Beschreibung

[0001] Die Erfindung bezieht sich auf ein Steuerungsverfahren zur ruckbegrenzten Geschwindigkeitsführung eines bewegbaren Maschinenelementes einer numerisch gesteuerten industriellen Bearbeitungsmaschine wie einer Werkzeugmaschine, einem Roboter oder dergleichen, wobei eine Bewegungsbahn des Maschinenelementes in unmittelbar aufeinanderfolgende interpolierbare Bewegungsabschnitte aufgelöst ist, sowie auf eine dazu korrespondierende numerische Steuerung.

[0002] Jedes schwingungsfähige, mechanische System (z. B. alle Achsen von Werkzeugmaschinen) ist in der Regel durch mindestens eine Eigenfrequenz gekennzeichnet, die bei einem Verfahrvorgang angeregt wird und sich im Laufschwungwert bemerkbar macht. Aus diesem Grund ist man bestrebt, die Anregung der Mechanik zu vermeiden.

[0003] Für die Geschwindigkeitsführung einer numerischen Steuerung, z. B. für eine Werkzeugmaschine oder einen Roboter, gehört daher heutzutage eine Ruckbegrenzung zum Stand der Technik. Damit soll eine geringere Belastung der einzelnen Achsen einer Maschine erreicht werden, ohne große Nachteile in der Programmbearbeitungszeit zu erhalten.

[0004] Mit einer Ruckbegrenzung ist es möglich, den Aufbau der Beschleunigung für einen Verfahrvorgang so zu verzögern, dass der Sollwert geglättet und die Mechanik möglichst wenig schwingungsanregend bewegt wird.

[0005] Die Glättungswirkung einer Ruckbegrenzung ist jedoch stark vom geforderten Sollwertverlauf abhängig. Messungen und theoretische Untersuchungen haben gezeigt, dass höherfrequente Beschleunigungs- und Bremsvorgänge mit geringerer Dynamik durchgeführt werden müssen, um die schwingungsfähige Mechanik nicht so stark anzuregen. Diese Abhängigkeit gilt sowohl bei kurzen Positionsvorgängen, als auch im Bahnsteuerbetrieb.

[0006] Derzeit wird als Abhilfe für dieses Problem der Ruck- und Beschleunigungsgrenzwert so niedrig eingestellt, dass auch hochfrequente Änderungen der Bahngeschwindigkeit die Schwingungen nicht zu stark anregen. Durch diese geringen eingestellten Dynamikwerte wird jedoch unerwünschterweise oftmals eine höhere Bahngeschwindigkeit und damit eine kürzere Programmbearbeitungszeit verhindert.

[0007] Eine bekannte Methode, um ein Maschinen-schonendes Geschwindigkeitsprofil zu erhalten, ist eine Ruckbegrenzung. In einer Phase 1 wird auf die maximal zulässige Beschleunigung verfahren. In Phase 2 wird konstant weiterbeschleunigt, die Geschwindigkeit nimmt nur noch linear zu. In Phase 3 wird die Beschleunigung wieder abgebaut. Im Folgenden wird mit dem Begriff Beschleunigung immer auch die Möglichkeit einer negativen Beschleunigung eingeschlossen.

[0008] Am Ende der Phase 3 ist somit eine maximal zulässige Bahngeschwindigkeit erreicht, mit der in einer Phase 4 weiter verfahren wird. In weiteren Phasen 5 bis 7 wird die Geschwindigkeit nun analog abgebaut, so dass die Bahngeschwindigkeit bei Erreichen einer Sollposition Null beträgt. Dazu wird in der Phase 5 eine negative Beschleunigung aufgebaut, die in der Phase 6 konstant gehalten wird und in der Phase 7 schließlich wieder zu Null abgebaut wird. Bezuglich der Ruckbelastung einer Maschine ist die Steigung der Beschleunigung in den Phasen 1, 3, 5 und 7 kritisch. In diesen Phasen weist der Geschwindigkeitsverlauf einen polynomialem Verlauf auf, während in den übrigen Phasen die Geschwindigkeit linear verläuft oder konstant ist.

[0009] Bisher setzt sich der zeitliche Verlauf des Rucks  $r(t)$  somit aus konstanten rechteckförmigen Grundformen

zusammen. Die Darstellung in Fig. 1 zeigt den zeitlichen Verlauf des Rucks in Abhängigkeit von Zeiten  $t_0$ ,  $t_{s0}$  und  $t_{e0}$ , die die jeweiligen Zeitspannen für den Ruck  $r$ , die Phase mit konstanter Beschleunigung  $a$  und ein Verfahren mit konstanter Geschwindigkeit  $v$ . Der Ruck  $r(t)$  ist entweder gleich Null oder gleich seinem zulässigen Maximalwert  $r_0$  mit positivem oder negativem Vorzeichen:  $r(t) \in \{0, +r_0, -r_0\}$ .

[0010] Diese Art der Ruckbegrenzung zeichnet sich vor allem dadurch aus, dass sie in Abhängigkeit der Ruckbegrenzung zu einer Verlängerung der Programmbearbeitungszeit im Vergleich zur beschleunigungsbegrenzten Geschwindigkeitsführung führt. Sofern an einer solchen Maschine aufgrund der Ruckbegrenzung eine höhere Beschleunigung eingestellt werden kann, ist eventuell sogar eine kürzere Bearbeitungszeit möglich.

[0011] Problematisch dabei ist aber – wie eingangs erwähnt –, dass solche hochdynamischen Beschleunigungs- und Bremsvorgänge auf der Bahn in einem bestimmten Frequenzbereich zur Anregung von mechanischen Schwingungen führen können. Die Dynamik dieser Vorgänge sollte daher an die Maschinengegebenheiten angepasst werden.

[0012] Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es daher, eine Möglichkeit zu schaffen, um mit einer Ruckbegrenzung kritische Resonanzfrequenzen einer Maschine oder eines beweglichen Maschinenelementes nicht anzuregen.

[0013] Gemäß der vorliegenden Erfindung wird diese Aufgabe dadurch gelöst, dass das eingangs genannte Steuerungsverfahren weitergebildet wird, indem bei der Interpolation resultierende Ruckprofile gezielt derart angepasst werden, dass eine filternde Wirkung der Ruckbegrenzung als Bandsperrn so beeinflusst wird, dass die Frequenzen der Bandsperrn im wesentlichen mit den Eigenfrequenzen des Maschinenelementes und/oder der Maschine oder mit einer Auswahl solcher Eigenfrequenzen zusammenfallen.

[0014] Eine erste vorteilhafte Ausgestaltung des Verfahrens gemäß der vorliegenden Erfindung zeichnet sich dadurch aus, dass zur gezielten Anpassung der Frequenzen der Bandsperrn der Parameter Ruck und/oder Beschleunigung und/oder Geschwindigkeit im Hinblick auf das bei der Interpolation resultierende Ruckprofil vorgegeben wird.

[0015] Dabei hat es sich als günstig herausgestellt, wenn zur gezielten Anpassung der Frequenzen der Bandsperrn bei einem rechteckförmigen Ruckverlauf unterschiedliche konstante Ruckwerte vorgegeben werden.

[0016] Eine alternative vorteilhafte Ausgestaltung des Verfahrens gemäß der vorliegenden Erfindung zeichnet sich dadurch aus, dass zur gezielten Anpassung der Frequenzen der Bandsperrn eine Formänderung des Ruckprofils durch Vorgabe von entsprechenden Formfunktionen für den Ruck erfolgt.

[0017] Hierbei hat es sich als vorteilhaft herausgestellt, wenn eine Formänderung des Ruckprofils durch Verrundung eines rechteckförmigen Ruckverlaufs erfolgt. Dies gelingt besonders effektiv, indem eine Verrundung eines rechteckförmigen Ruckverlaufs mit dem Quadrat einer Sinus-Funktion erfolgt. Dies gelingt besonders gut durch den Einsatz von harmonischen Funktionen wie z. B. dem Quadrat einer Sinus-Funktion.

[0018] Wenn eine Formänderung des Ruckprofils derart vorgenommen wird, dass die Fläche des Ruckprofils nach der Formänderung der Fläche des Ruckprofils vor der Formänderung bei gleicher Zeit entspricht, so wird immer erreicht, dass keine Wegverluste auftreten.

[0019] Im Fall einer Verrundung eines rechteckförmigen Ruckverlaufs, aber auch bei anderen Ruckverläufen, gelingt dies besonders gut, indem der maximale Ruckwert soweit vergrößert wird, bis die Fläche des Ruckprofils für den Ruck gleich der Fläche des rechteckförmigen Verlaufs in der glei-

chen Ruckzeit  $t_r$  ist.

[0020] Nach einer weiteren vorteilhaften Ausgestaltung der Erfindung werden bei der Interpolation resultierende Ruckprofile zur gezielten Anpassung anhand eines satzübergreifend über mehrere interpolierbare Bewegungsabschnitte im Voraus bestimmten Geschwindigkeitsverlaufs des Maschinenelementes auf dessen Bewegungsbahn ermittelt.

[0021] Nach einer weiteren vorteilhaften Ausgestaltung der Erfindung erfolgt für jede beteiligte Achse eine separate Anpassung von Ruckprofilen, wobei ein axiales Ruckprofil analysiert wird, indem für eine angenommene konstante Bahngeschwindigkeit des Maschinenelementes der resultierende axiale Geschwindigkeitsverlauf analysiert wird. Vorteilhaft werden dazu bei der Interpolation resultierende axiale Ruckprofile abschnittsweise satzübergreifend im Voraus ermittelt, wobei ein Abschnitt jeweils durch Minima oder Maxima des axialen Geschwindigkeitsverlaufs gebildet wird.

[0022] Ferner wird die Aufgabe der Erfindung durch eine numerische Steuerung zur ruckbegrenzten Geschwindigkeitsführung eines bewegbaren Maschinenelementes einer numerisch gesteuerten industriellen Bearbeitungsmaschine wie einer Werkzeugmaschine, einem Roboter oder dergleichen gelöst, wobei ein Interpolator zur Interpolation einer in unmittelbar aufeinanderfolgende interpolierbare Bewegungsabschnitte aufgelösten Bewegungsbahn des Maschinenelementes vorgesehen ist, indem durch eine Ruckbegrenzung bei der Interpolation resultierende Ruckprofile gezielt so adaptierbar sind, dass eine filternde Wirkung der Ruckbegrenzung als Bandsperren so beeinflussbar ist, dass die Frequenzen der Bandsperren im wesentlichen mit den Eigenfrequenzen des Maschinenelementes und/oder der Maschine oder mit einer Auswahl solcher Eigenfrequenzen zusammenfallen.

[0023] Gemäß einer ersten vorteilhaften Ausgestaltung der erfundungsgemäßen numerischen Steuerung ist durch die Ruckbegrenzung zur gezielten Anpassung der Frequenzen der Bandsperren der Parameter Ruck und/oder Beschleunigung und/oder Geschwindigkeit im Hinblick auf das bei der Interpolation resultierende Ruckprofil vorgebarbar.

[0024] Dies gelingt besonders einfach und damit effektiv, indem durch die Ruckbegrenzung zur gezielten Anpassung der Frequenzen der Bandsperren bei einem rechteckförmigen Ruckverlauf unterschiedliche konstante Ruckwerte vorgebar sind.

[0025] Gemäß einer alternativen vorteilhaften Ausgestaltung der erfundungsgemäßen numerischen Steuerung ist durch die Ruckbegrenzung zur gezielten Anpassung der Frequenzen der Bandsperren die Form des Ruckprofils durch Vorgabe von entsprechenden Formfunktionen für den Ruck änderbar. Dabei hat es sich als günstig herausgestellt, wenn durch die Ruckbegrenzung die Form des Ruckprofils durch Verrundung eines rechteckförmigen Ruckverlaufs änderbar ist.

[0026] Wenn durch die Ruckbegrenzung eine Formänderung des Ruckprofils derart vornehmbar ist, dass die Fläche des Ruckprofils nach der Formänderung der Fläche des Ruckprofils vor der Formänderung bei gleicher Zeit entspricht, so lassen sich Wegverluste aufgrund der Ruckbegrenzung vermeiden. Dies gelingt besonders gut, indem durch die Ruckbegrenzung der maximale Ruckwert eines durch Verrundung formgeänderten rechteckförmigen Ruckverlaufs soweit vergrößerbar ist, bis die Fläche des Ruckprofils für den Ruck gleich der Fläche des rechteckförmigen Verlaufs in der gleichen Ruckzeit  $t_r$  ist.

[0027] Gemäß einer weiteren vorteilhaften Ausgestaltung der erfundungsgemäßen numerischen Steuerung sind durch die Steuerung bei der Interpolation resultierende Ruckpro-

file für die Ruckbegrenzung zur gezielten Anpassung anhand eines satzübergreifend über mehrere interpolierbare Bewegungsabschnitte im Voraus bestimmten Geschwindigkeitsverlaufs des Maschinenelementes auf dessen Bewegungsbahn ermittelbar.

[0028] Nach einer weiteren erforderlichen Ausgestaltung ist durch die Ruckbegrenzung für jede beteiligte Achse ein axiales Ruckprofil analysierbar, indem für eine angenommene konstante Bahngeschwindigkeit des Maschinenelementes der resultierende axiale Geschwindigkeitsverlauf analysiert wird.

[0029] Dazu sind durch die numerische Steuerung vorzugsweise resultierende axiale Ruckprofile abschnittsweise satzübergreifend im Voraus ermittelbar, wobei ein Abschnitt jeweils durch Minima oder Maxima des axialen Geschwindigkeitsverlaufs gebildet wird.

[0030] Nach einer weiteren erforderlichen Ausgestaltung ist die Ruckbegrenzung als ein digitales Filter ausgestaltet, das in jedem Arbeitspunkt des Maschinenelementes einen zugehörigen Rucksollwert liefert.

[0031] Durch die beschriebene gezielte Anpassung des Ruckverlaufs wird eine Anregung von Resonanzen vermieden. Damit wird zusätzlich ermöglicht, die Dynamikgrenzwerte zu erhöhen und damit einen Gewinn in der Programmbearbeitungszeit zu erhalten.

[0032] Wesentliche Vorteile der beschriebenen erfundungsgemäßen Ruckbegrenzung bestehen u. a. in: Wesentlich kleinere Schwingungsanregung beim Verfahren des gleichen Weges in der gleichen Zeit.

[0033] Für Werkzeugmaschinen bedeutet das wesentlich weicheres Verfahren, höhere Genauigkeit bei der Oberflächenbearbeitung und beim Formfräsen sowie bessere Qualität.

[0034] Schnelleres Verfahren bei gleicher Schwingungsanregung durch größeren Ruck.

[0035] Für Werkzeugmaschinen bedeutet das schnellere Bearbeiten mit der gleichen Qualität, größere Stückzahlen in der gleichen Zeit und größere Effektivität.

[0036] Die Wirkungsweise der Adaption von Ruckprofilen sowie weitere Vorteile und Details werden im folgenden anhand mehrerer Ausführungsbeispiele und in Verbindung mit den Figuren verdeutlicht. Es zeigen in Prinzipdarstellung:

[0037] Fig. 1 ein rechteckförmiges Ruckprofil  $r$  über die Zeit  $t$  bei einer herkömmlichen Ruckbegrenzung,

[0038] Fig. 2 ein Schwingungsfähiges System mit ruckbegrenztem Sollwert und schwingendem Lageistwert,

[0039] Fig. 3 die Filterwirkung einer Ruckbegrenzung für einen konstanten rechteckförmigen Ruckverlauf,

[0040] Fig. 4 ein Ruckprofil mit unterschiedlichen Ruckwerten gemäß der Erfindung bei rechteckförmigen Ruckverlauf,

[0041] Fig. 5 den Einfluss unterschiedlicher Ruckwerte auf die Bandsperren des ruckbegrenzenden Filters anhand einer Gegenüberstellung der Filterwirkung mit konstantem Ruck und mit unterschiedlichen Ruckwerten,

[0042] Fig. 6 eine erfundungsgemäße Formänderung des Ruckverlaufs durch Verrundung der rechteckförmigen Form,

[0043] Fig. 7 einen Ruckverlauf  $r$  anhand einer Gegenüberstellung von herkömmlichem rechteckförmigem Ruck und einer erfundungsgemäßen Verdoppelung des maximalen Ruckwertes eines  $\sin^2$ -verrundeten Ruckverlaufs, um gleiche Beschleunigung, Geschwindigkeit und gleichen Weg zu erreichen,

[0044] Fig. 8 die zu Fig. 7 zugehörigen Beschleunigungsverläufe a,

[0045] Fig. 9 die zu Fig. 7 zugehörigen Geschwindig-

keitsverläufe v,

[0046] Fig. 10 die zu Fig. 7 zugehörigen Wegverläufe x,

[0047] Fig. 11 die Filterwirkung des  $\sin^2$ -verrundeten Ruckverlaufs im Vergleich zum rechteckförmigen Verlauf, [0048] Fig. 12 eine Gegenüberstellung von herkömmlichem rechteckförmigem und  $\sin^2$ -verrundetem Ruckverlauf r für gleiche Schwingungsanregung bei 32 Hz,

[0049] Fig. 13 die zu Fig. 12 zugehörigen Beschleunigungsverläufe a,

[0050] Fig. 14 die zu Fig. 12 zugehörigen Geschwindigkeitsverläufe v,

[0051] Fig. 15 die zu Fig. 12 zugehörigen Wegverläufe x,

[0052] Fig. 16 eine Verdeutlichung der gleichen Filterwirkung des rechteckförmigen und des  $\sin^2$ -verrundeten Ruckverlaufs bei 32 Hz,

[0053] Fig. 17 eine erfindungsgemäße Formänderung der Ruckfunktion mit unterschiedlichen Ruckwerte.

[0054] Um die filternde Wirkung der Ruckbegrenzung systematisch zu beschreiben, wird – wie in Fig. 2 als schwingungsfähiges System M mit ruckbegrenztem Sollwert  $x_{sol}$  und schwingendem Lageistwert  $x_{ist}$  dargestellt – ein rückäquivalentes Filter mit dem Frequenzgang A(f) berechnet, das abhängig von den Begrenzungen (z. B. maximale Geschwindigkeit  $v_0$ ) bestimmt werden kann. Dieses Filter erlaubt Aussagen über die Anregung des schwingungsfähigen Systems im gesamten Frequenzbereich.

[0055] Die filternde Wirkung der Ruckbegrenzung wurde im Rahmen der Erfahrung systematisch analysiert und optimiert. Aus dem zeitlichen Verlauf des Rucks r lässt sich die Filterwirkung bestimmen, die in Fig. 3 für einen konstanten rechteckförmigen Ruckverlauf dargestellt ist, indem entsprechende Amplitudenwerte A über die Frequenz f aufgetragen sind. Für ein beliebiges mechanisches System lässt sich damit die filternde Wirkung der Ruckbegrenzung bestimmen.

[0056] Analysiert man die Ruckbegrenzung mit Hilfe eines solchen rückäquivalenten Filters, lassen sich die erfindungsgemäßen systematischen Maßnahmen zur Minimierung der Schwingungsanregung gut nachvollziehen. Diese Maßnahmen, die im Folgenden beschrieben werden, gehen weit über die bisher einfach angewandte herkömmliche Ruckbegrenzung hinaus.

[0057] Eine Begrenzung des Rucks allein ist nicht ausreichend, um die Schwingungsanregung auf ein Minimum zu reduzieren. Der zeitliche Verlauf der Ruckbegrenzung ist daher auf seine Filterwirkung zu beurteilen. Verbesserungen bei der Schwingungsanregung lassen sich auf verschiedene Weise erzielen.

[0058] Eine erste erfindungsgemäße Maßnahme ist die gezielte Anpassung der Parameter Ruck, Beschleunigung und Geschwindigkeit.

[0059] Die Darstellung gemäß der Fig. 4 zeigt hierzu unterschiedliche Ruckwerte bei einem rechteckförmigen Ruckverlauf r. Die Ruckfunktion kann durch unterschiedliche, konstante Ruckwerte  $r_1$  bis  $r_4$  aufgebaut werden. Durch die verschiedenen Ruckwerte kann bei der Filterwirkung (siehe dazu die Fig. 5) gezielt Einfluss auf die Amplitudensabsenkungen A genommen werden, die wie Bandsperrnen wirken. Die Darstellung nach Fig. 5 zeigt hierzu den Einfluss unterschiedlicher Ruckwerte auf die Bandsperrnen des ruckbegrenzenden Filters anhand einer Gegenüberstellung der Filterwirkung mit konstantem Ruck (durchgehender Verlauf) und mit unterschiedlichen Ruckwerten (strichpunktiiert).

[0060] Mit der gezielten Abstimmung der Ruckwerte  $r_1$  bis  $r_4$  und/oder der Anpassung der maximalen Beschleunigung  $a_0$  und maximalen Geschwindigkeit  $v_0$  können die Bandsperrnen so beeinflusst werden, dass sie dort wirken, wo

die Eigenfrequenzen des schwingungsfähigen Systems liegen. Fallen die Frequenzen der Bandsperrnen mit den Eigenfrequenzen des Systems genau zusammen, erreicht man die beste Dämpfung. Dies liefert bessere Ergebnisse als wenn

5 nur der maximale Ruck  $r_0$  einheitlich variiert und auf die niedrigste Eigenfrequenz des mechanischen Systems abgestimmt wird, um eine Schwingungsanregung zu verhindern. [0061] Eine andere erfindungsgemäße Maßnahme besteht in einer Formänderung der Ruckfunktion.

[0062] Verwendet man anstelle des rechteckförmigen Ruckverlaufs sogenannte Formfunktionen für den Ruck, kann dadurch die Filterwirkung optimiert werden. Diese auf das Ruckfenster zeitlich begrenzten Formfunktionen können jede beliebige Form annehmen. Durch die Art der Ver rundung im Vergleich zum rechteckförmigen Verlauf kann gezielt auf die Filterwirkung Einfluss genommen werden. Die Darstellung nach der Fig. 6 zeigt eine solche Formänderung des Ruckverlaufs durch Verrundung der rechteckförmigen Form bei einem einheitlichen maximalen Ruck  $r_0$ .

[0063] Ist der maximale Ruckwert  $r_0$  bei verrundetem Ruck der gleiche wie bei rechteckförmigem Ruckverlauf, so wird die Beschleunigung und Geschwindigkeit langsamer auf- und wieder abgebaut, so dass bei gleicher Zeit ein kürzerer Weg zurückgelegt wird. Um der Anforderung, in gleicher Zeit den gleichen Weg wie bei rechteckförmigen Ruckverlauf zurückzulegen, gerecht zu werden, wird der maximale Ruckwert des verrundeten Verlaufs  $r_0$  und so vergrößert, dass die Fläche im Ruckfenster  $t_r$  gleich  $r_0 \cdot t_r$  des rechteckförmigen Verlaufs ist. Ist das der Fall werden auch die 30 gleichen Beschleunigungen und Geschwindigkeiten erreicht.

[0064] Im folgenden wird anhand von Fig. 7 bis Fig. 10 am Beispiel eines  $\sin^2$ -verrundeten Rucks gezeigt, welche maßgeblichen Verbesserungen sich durch die Anwendung

35 von Formfunktionen auf das Ruckfenster erreichen lassen. Die oben beschriebene Abhängigkeit des maximalen Ruckwertes für gleichen Weg in gleicher Zeit ergibt bei der  $\sin^2$ -Formfunktion, dass der maximale Ruckwert  $r_0$  bei der gleichen Ruckzeit  $t_r$  verdoppelt werden muss.

[0065] Die Fig. 7 zeigt einen Ruckverlauf r anhand einer Gegenüberstellung von herkömmlichem rechteckförmigem Ruck (durchgehender Verlauf) und einer erfindungsgemäßen Verdoppelung des maximalen Ruckwertes eines  $\sin^2$ -verrundeten Ruckverlaufs (strichpunktiiert), um gleiche Beschleunigung, Geschwindigkeit und gleichen Weg zu erreichen. Die Fig. 8 zeigt die zu Fig. 7 zugehörigen Beschleunigungsverläufe a, Fig. 9 die zu Fig. 7 zugehörigen Geschwindigkeitsverläufe v und Fig. 10 die zu Fig. 7 zugehörigen Wegverläufe x.

[0066] Die Filterwirkung des  $\sin^2$ -verrundeten Ruckverlaufs im Vergleich zum rechteckförmigen Verlauf und damit eine Aussage zur Schwingungsanregung beider Fahrkurven ist in Fig. 11 dargestellt. Die Form der beiden Filter ist ähnlich, was in diesem Fall an den gleichen Verfahrzeiten  $t_r$ ,  $t_a$  und  $t_v$  liegt und unterscheidet sich aber erheblich in den Amplitudenhöhen. Ab der Frequenz  $f = \sqrt{2}/t_r$  ist die Amplitudensabsenkung des  $\sin^2$ -verrundeten Ruckverlaufs mit 40 dB/Dekade besser als die des rechteckförmigen Ruckverlaufs. Das bedeutet, dass für Frequenzen größer als  $\sqrt{2}/t_r$  Hz

60 die Schwingungsanregung bei  $\sin^2$ -verrundetem Ruck wesentlich kleiner ist. Je weiter die Eigenfrequenz eines schwingungsfähigen mechanischen Systems von dieser Frequenz entfernt liegt, desto größer wird der Unterschied. Beispielsweise liegt der Unterschied in Fig. 11 bei einem Faktor 5, wenn man die Schwingungsanregung bei 30 Hz betrachtet.

[0067] Nachdem die Anforderung gleicher Weg in gleicher Zeit betrachtet wurde, soll jetzt die Anforderung glei-

che Schwingungsanregung bei rechteckförmigem und  $\sin^2$ -verrundetem Ruckverlauf beurteilt werden. In Fig. 12 bis Fig. 15 sind für gleiche Schwingungsanregung bei 32 Hz die Fahrprofile für einen rechteckförmigen und einen  $\sin^2$ -verrundeten Ruckverlauf analog zu Fig. 7 bis Fig. 10 gegenübergestellt.

[0068] Bei einem  $\sin^2$ -verrundetem Ruckverlauf kann für die gleiche Schwingungsanregung bei 32 Hz mit wesentlich größerem Ruck gefahren werden. Das hat zur Folge, dass die Verfahrzeit für den  $\sin^2$ -verrundeten Ruckverlauf deutlich kleiner wird. Für dieses Beispiel, wo die Geschwindigkeit in die Begrenzung geht, beträgt die Zeitzahrsparnis ca. 15%. Geht die Geschwindigkeit nicht in die Begrenzung, wird der Zeitvorteil des  $\sin^2$ -verrundeten Ruckverlaufs gegenüber dem rechteckförmigen noch größer. Die Zeiten  $t_0$ ,  $t_{40}$  und  $t_{10}$  für beide Verfahrprofile sind jetzt unterschiedlich. Die Filterwirkung mit gleicher Schwingungsanregung des rechteckförmigen und des  $\sin^2$ -verrundeten Ruckverlaufs bei 32 Hz ist in Fig. 16 dargestellt.

[0069] Erfindungsgemäß kann auch eine Formänderung der Ruckfunktion mit Anpassung der Parameter Ruck, Beschleunigung und Geschwindigkeit vorgenommen werden.

[0070] Die in den ersten beiden Punkten beschriebenen erfundungsgemäßen Möglichkeiten zur Verbesserung der Schwingungsanregung können auch beliebig miteinander kombiniert werden, womit die Wirkung, möglichst wenig schwingungsanregend zu positionieren, noch verstärkt wird. Mit der Kombination beider Möglichkeiten kann man einerseits durch die Verrundung des Ruckverlaufs generell eine bessere Filterwirkung erzielen und andererseits zusätzlich durch unterschiedliche Ruckwerte  $r_1$  bis  $r_4$  die Bandspalten des ruckäquivalenten Filters gezielt auf die Eigenfrequenzen des mechanischen Systems abstimmen, so dass die Filterwirkung noch verstärkt wird. Die Verrundung der Ruckfunktion mit unterschiedlichen Ruckwerten ist in der Fig. 17 dargestellt.

#### Patentansprüche

1. Steuerungsverfahren zur ruckbegrenzten Geschwindigkeitsführung (v) eines bewegbaren Maschinenelementes einer numerisch gesteuerten industriellen Bearbeitungsmaschine wie einer Werkzeugmaschine, einem Roboter oder dergleichen, wobei eine Bewegungsbahn (x) des Maschinenelementes in unmittelbar aufeinanderfolgende interpolierbare Bewegungsabschnitte aufgelöst ist, dadurch gekennzeichnet, dass bei der Interpolation resultierende Ruckprofile (r) gezielt derart angepasst werden, dass eine filternde Wirkung der Ruckbegrenzung als Bandspalten so beeinflusst wird, dass die Frequenzen der Bandspalten im wesentlichen mit den Eigenfrequenzen ( $f_{eig}$ ) des Maschinenelementes und/oder der Maschine oder mit einer Auswahl solcher Eigenfrequenzen zusammenfallen.

2. Steuerungsverfahren zur ruckbegrenzten Geschwindigkeitsführung (v) eines bewegbaren Maschinenelementes einer numerisch gesteuerten industriellen Bearbeitungsmaschine nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass zur gezielten Anpassung der Frequenzen der Bandspalten der Parameter Ruck und/oder Beschleunigung und/oder Geschwindigkeit im Hinblick auf das bei der Interpolation resultierende Ruckprofil (r) vorgegeben wird.

3. Steuerungsverfahren zur ruckbegrenzten Geschwindigkeitsführung (v) eines bewegbaren Maschinenelementes einer numerisch gesteuerten industriellen Bearbeitungsmaschine nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass zur gezielten Anpassung der Frequenzen

der Bandspalten bei einem rechteckförmigen Ruckverlauf unterschiedliche konstante Ruckwerte ( $r_1 \dots r_4$ ) vorgegeben werden.

4. Steuerungsverfahren zur ruckbegrenzten Geschwindigkeitsführung (v) eines bewegbaren Maschinenelementes einer numerisch gesteuerten industriellen Bearbeitungsmaschine nach Anspruch 1, 2 oder 3, dadurch gekennzeichnet, dass zur gezielten Anpassung der Frequenzen der Bandspalten eine Formänderung des Ruckprofils durch Vorgabe von entsprechenden Formfunktionen für den Ruck erfolgt.

5. Steuerungsverfahren zur ruckbegrenzten Geschwindigkeitsführung (v) eines bewegbaren Maschinenelementes einer numerisch gesteuerten industriellen Bearbeitungsmaschine nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, dass eine Formänderung des Ruckprofils durch Verrundung eines rechteckförmigen Ruckverlaufs erfolgt.

6. Steuerungsverfahren zur ruckbegrenzten Geschwindigkeitsführung (v) eines bewegbaren Maschinenelementes einer numerisch gesteuerten industriellen Bearbeitungsmaschine nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass eine Verrundung eines rechteckförmigen Ruckverlaufs mit harmonischen Funktionen, insbesondere mit dem Quadrat einer Sinus-Funktion erfolgt.

7. Steuerungsverfahren zur ruckbegrenzten Geschwindigkeitsführung (v) eines bewegbaren Maschinenelementes einer numerisch gesteuerten industriellen Bearbeitungsmaschine nach Anspruch 4, 5 oder 6, dadurch gekennzeichnet, dass eine Formänderung des Ruckprofils derart vorgenommen wird, dass die Fläche des Ruckprofils nach der Formänderung der Fläche des Ruckprofils vor der Formänderung bei gleicher Zeit entspricht.

8. Steuerungsverfahren zur ruckbegrenzten Geschwindigkeitsführung (v) eines bewegbaren Maschinenelementes einer numerisch gesteuerten industriellen Bearbeitungsmaschine nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, dass der maximale Ruckwert eines durch Verrundung formgeänderten rechteckförmigen Ruckverlaufs soweit vergrößert wird, bis die Fläche des Ruckprofils gleich der Fläche des rechteckförmigen Verlaufs in der gleichen Ruckzeit  $t_r$  ist.

9. Steuerungsverfahren zur ruckbegrenzten Geschwindigkeitsführung (v) eines bewegbaren Maschinenelementes einer numerisch gesteuerten industriellen Bearbeitungsmaschine nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass bei der Interpolation resultierende Ruckprofile (r) zur gezielten Anpassung anhand eines satzübergreifend über mehrere interpolierbare Bewegungsabschnitte im Voraus bestimmten Geschwindigkeitsverlaufs (v) des Maschinenelementes auf dessen Bewegungsbahn (x) ermittelt werden.

10. Steuerungsverfahren zur ruckbegrenzten Geschwindigkeitsführung (v) eines bewegbaren Maschinenelementes einer numerisch gesteuerten industriellen Bearbeitungsmaschine nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass für jede beteiligte Achse eine separate Anpassung von Ruckprofilen erfolgt, wobei ein axiales Ruckprofil analysiert wird, indem für eine angenommene konstante Bahngeschwindigkeit des Maschinenelementes der resultierende axiale Geschwindigkeitsverlauf analysiert wird.

11. Steuerungsverfahren zur ruckbegrenzten Geschwindigkeitsführung (v) eines bewegbaren Maschinenelementes einer numerisch gesteuerten industriellen Bearbeitungsmaschine nach Anspruch 10, dadurch

gekennzeichnet, dass bei der Interpolation resultierende axiale Ruckprofile abschnittsweise satzübergreifend im Voraus ermittelt werden, wobei ein Abschnitt jeweils durch Minima oder Maxima des axialen Geschwindigkeitsverlaufs gebildet wird.

12. Numerische Steuerung zur ruckbegrenzten Geschwindigkeitsführung (v) eines bewegbaren Maschinenelementes einer numerisch gesteuerten industriellen Bearbeitungsmaschine wie einer Werkzeugmaschine, einem Roboter oder dergleichen, wobei ein Interpolator zur Interpolation einer in unmittelbar aufeinanderfolgende interpolierbare Bewegungsabschnitte aufgelösten Bewegungsbahn (x) des Maschinenelementes vorgesehen ist, dadurch gekennzeichnet, dass durch eine Ruckbegrenzung bei der Interpolation resultierende Ruckprofile (r) gezielt so adaptierbar sind, dass eine filternde Wirkung der Ruckbegrenzung als Bandsperren so beeinflussbar ist, dass die Frequenzen der Bandsperren im wesentlichen mit den Eigenfrequenzen ( $f_{\text{eig}}$ ) des Maschinenelementes und/oder der Maschine oder mit einer Auswahl solcher Eigenfrequenzen zusammenfallen.

13. Numerische Steuerung zur ruckbegrenzten Geschwindigkeitsführung (v) eines bewegbaren Maschinenelementes einer numerisch gesteuerten industriellen Bearbeitungsmaschine nach Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet, dass durch die Ruckbegrenzung zur gezielten Anpassung der Frequenzen der Bandsperren der Parameter Ruck und/oder Beschleunigung und/oder Geschwindigkeit im Hinblick auf das bei der Interpolation resultierende Ruckprofil (r) vorgebar ist.

14. Numerische Steuerung zur ruckbegrenzten Geschwindigkeitsführung (v) eines bewegbaren Maschinenelementes einer numerisch gesteuerten industriellen Bearbeitungsmaschine nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, dass durch die Ruckbegrenzung zur gezielten Anpassung der Frequenzen der Bandsperren bei einem rechteckförmigen Ruckverlauf unterschiedliche konstante Ruckwerte ( $r1 \dots r4$ ) vorgebar sind.

15. Numerische Steuerung zur ruckbegrenzten Geschwindigkeitsführung (v) eines bewegbaren Maschinenelementes einer numerisch gesteuerten industriellen Bearbeitungsmaschine nach Anspruch 12, 13 oder 14, dadurch gekennzeichnet, dass durch die Ruckbegrenzung zur gezielten Anpassung der Frequenzen der Bandsperren die Form des Ruckprofils durch Vorgabe von entsprechenden Formfunktionen für den Ruck änderbar ist.

16. Numerische Steuerung zur ruckbegrenzten Geschwindigkeitsführung (v) eines bewegbaren Maschinenelementes einer numerisch gesteuerten industriellen Bearbeitungsmaschine nach Anspruch 15, dadurch gekennzeichnet, dass durch die Ruckbegrenzung die Form des Ruckprofils durch Verrundung eines rechteckförmigen Ruckverlaufs änderbar ist, insbesondere mit harmonischen Funktionen.

17. Numerische Steuerung zur ruckbegrenzten Geschwindigkeitsführung (v) eines bewegbaren Maschinenelementes einer numerisch gesteuerten industriellen Bearbeitungsmaschine nach Anspruch 15 oder 16, dadurch gekennzeichnet, dass durch die Ruckbegrenzung eine Formänderung des Ruckprofils derart vornehmbar ist, dass die Fläche des Ruckprofils nach der Formänderung der Fläche des Ruckprofils vor der Formänderung bei gleicher Zeit entspricht.

18. Numerische Steuerung zur ruckbegrenzten Geschwindigkeitsführung (v) eines bewegbaren Maschinenelementes einer numerisch gesteuerten industriell-

len Bearbeitungsmaschine nach Anspruch 17, dadurch gekennzeichnet, dass durch die Ruckbegrenzung der maximale Ruckwert eines durch Verrundung formgeänderten rechteckförmigen Ruckverlaufs soweit vergrößerbar ist, bis die Fläche des Ruckprofils für den Ruck gleich der Fläche des rechteckförmigen Verlaufs in der gleichen Ruckzeit  $t_r$  ist.

19. Numerische Steuerung zur ruckbegrenzten Geschwindigkeitsführung (v) eines bewegbaren Maschinenelementes einer numerisch gesteuerten industriellen Bearbeitungsmaschine nach einem der vorangehenden Ansprüche 12 bis 18, dadurch gekennzeichnet, dass durch die Steuerung bei der Interpolation resultierende Ruckprofile (r) für die Ruckbegrenzung zur gezielten Anpassung anhand eines satzübergreifend über mehrere interpolierbare Bewegungsabschnitte im Voraus bestimmten Geschwindigkeitsverlaufs (v) des Maschinenelementes auf dessen Bewegungsbahn (x) ermittelbar sind.

20. Numerische Steuerung zur ruckbegrenzten Geschwindigkeitsführung (v) eines bewegbaren Maschinenelementes einer numerisch gesteuerten industriellen Bearbeitungsmaschine nach einem der vorangehenden Ansprüche 12 bis 19, dadurch gekennzeichnet, dass durch die Ruckbegrenzung für jede beteiligte Achse ein axiales Ruckprofil analysierbar ist, indem für eine angenommene konstante Bahngeschwindigkeit des Maschinenelementes der resultierende axiale Geschwindigkeitsverlauf analysiert wird.

21. Numerische Steuerung zur ruckbegrenzten Geschwindigkeitsführung (v) eines bewegbaren Maschinenelementes einer numerisch gesteuerten industriellen Bearbeitungsmaschine nach Anspruch 20, dadurch gekennzeichnet, dass durch die numerische Steuerung resultierende axiale Ruckprofile abschnittsweise satzübergreifend im Voraus ermittelbar sind, wobei ein Abschnitt jeweils durch Minima oder Maxima des axialen Geschwindigkeitsverlaufs gebildet wird.

22. Numerische Steuerung zur ruckbegrenzten Geschwindigkeitsführung eines bewegbaren Maschinenelementes nach einem der vorangehenden Ansprüche 12 bis 21, dadurch gekennzeichnet, dass die Ruckbegrenzung als ein digitales Filter ausgestaltet ist, das in jedem Arbeitspunkt ( $x_{\text{Soll}}$ ) des Maschinenelementes einen zugehörigen Rucksollwert liefert.

---

Hierzu 9 Seite(n) Zeichnungen

---

**- Leerseite -**

**THIS PAGE BLANK (USPTO)**

FIG 1

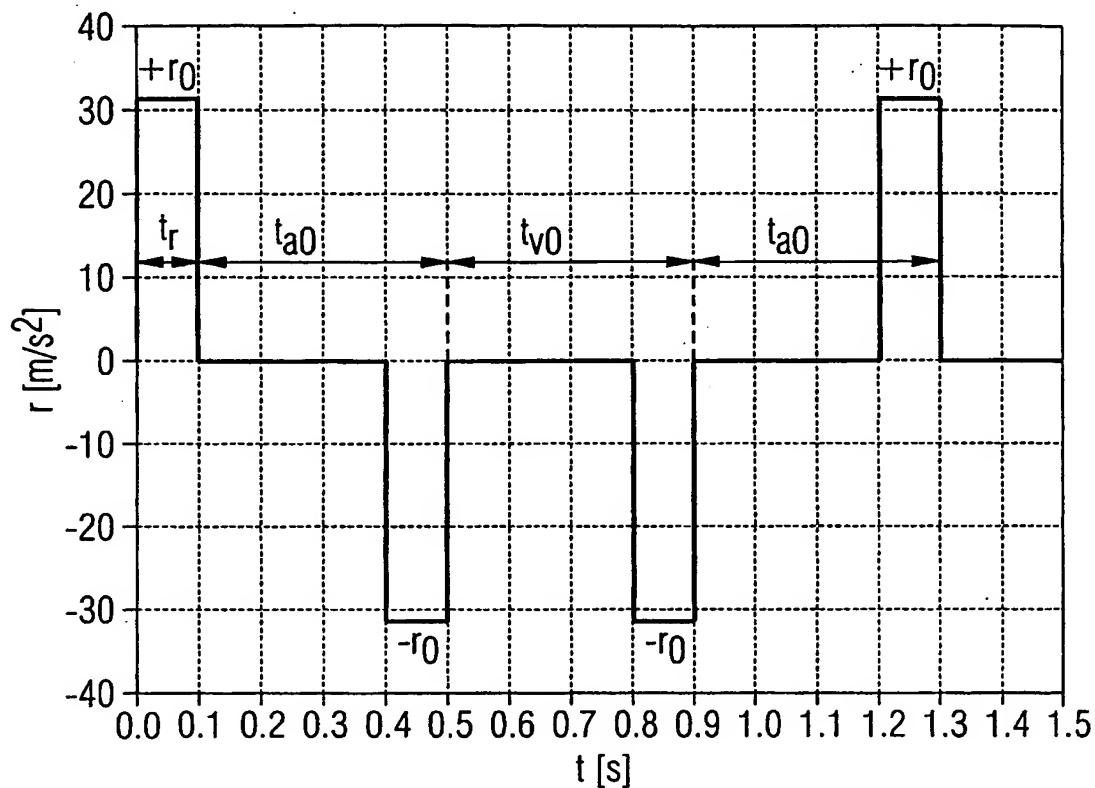


FIG 2

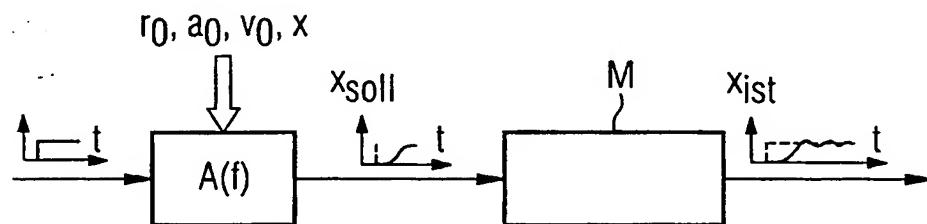


FIG 3

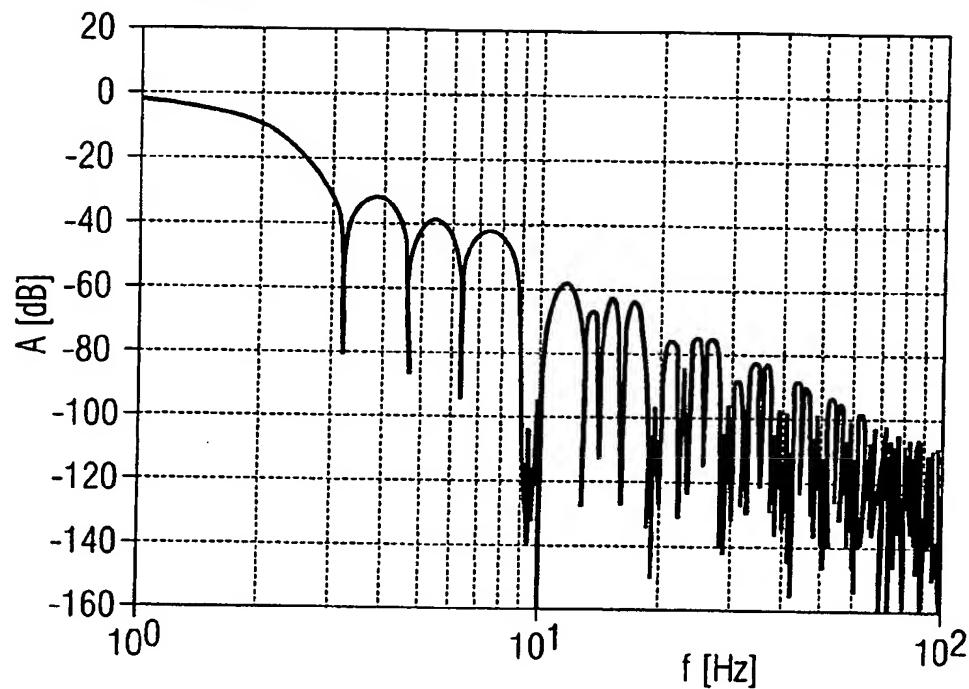


FIG 4

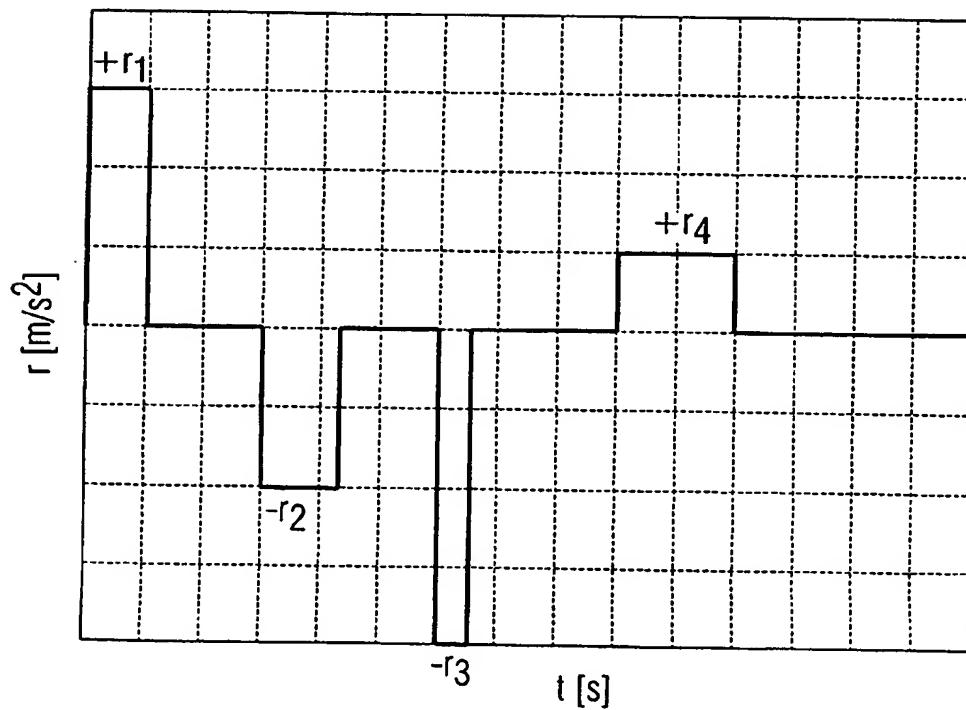


FIG 5

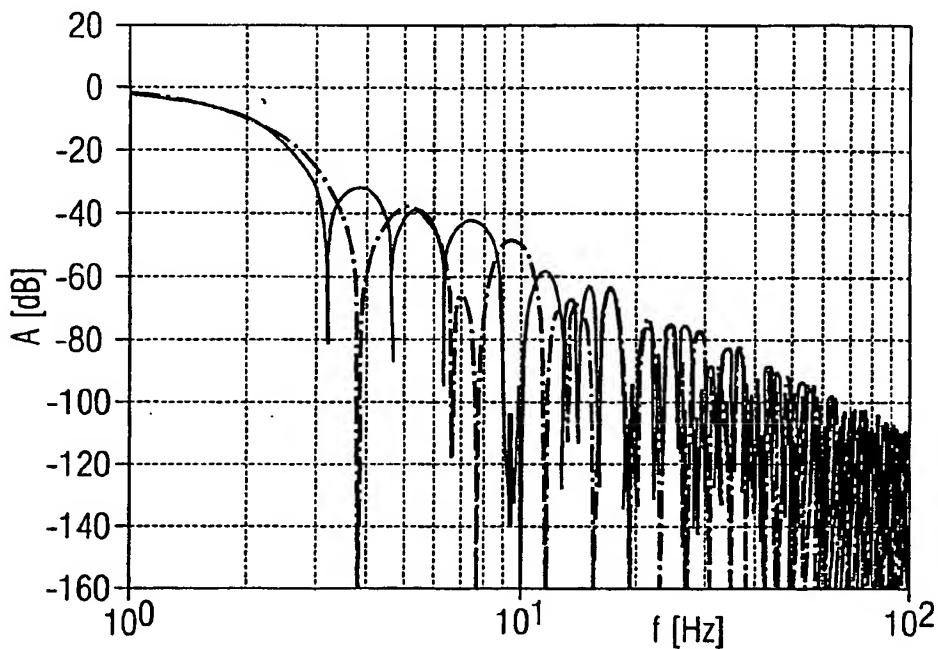
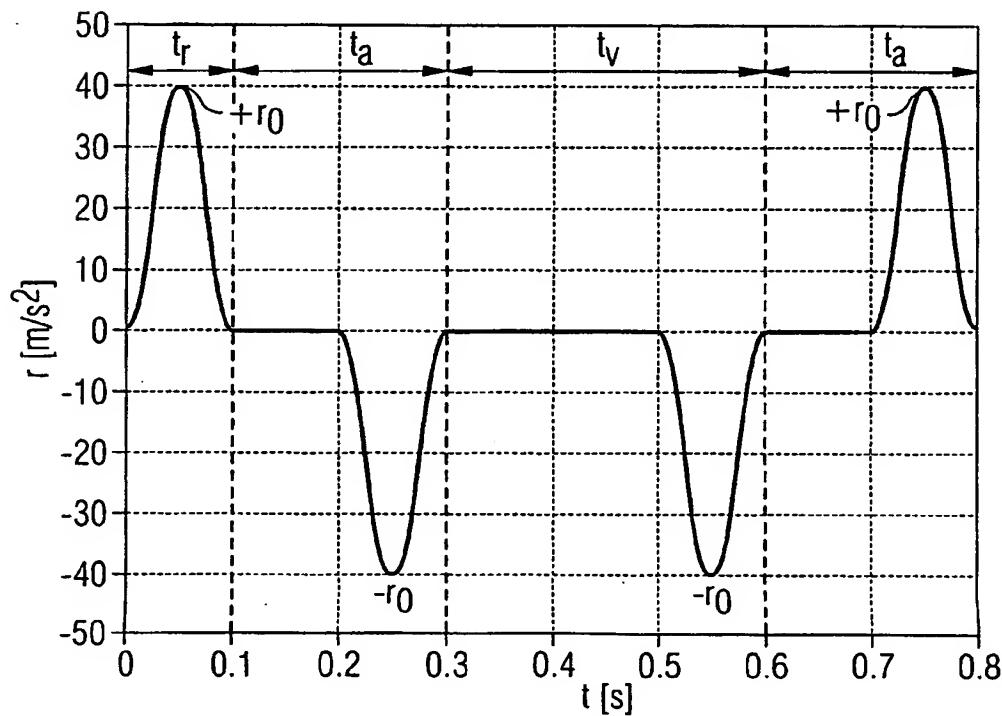
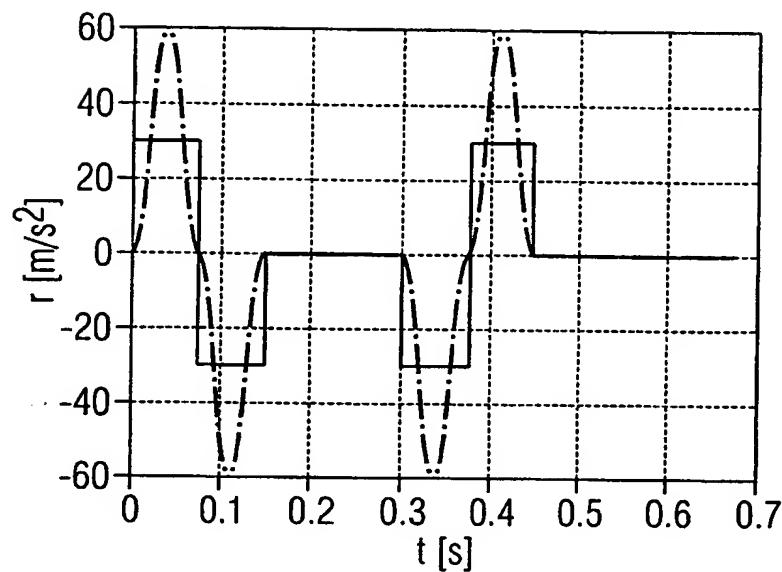
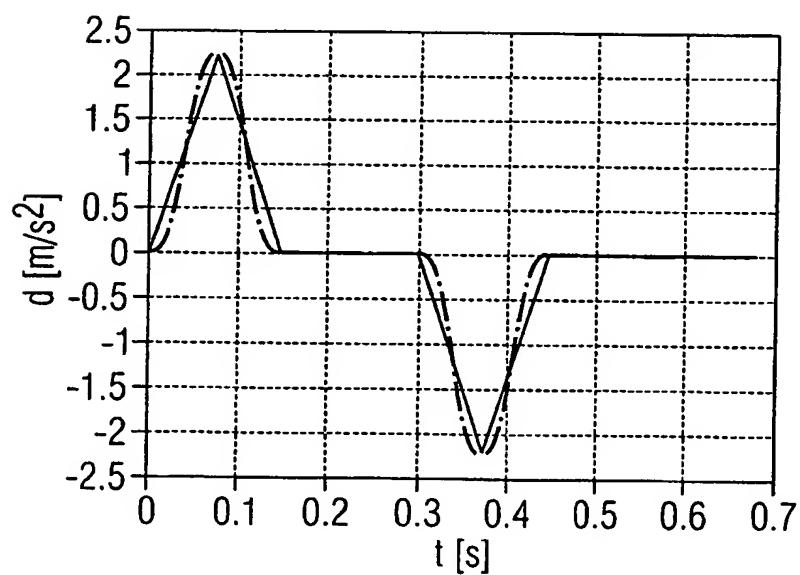


FIG 6



**FIG 7****FIG 8**

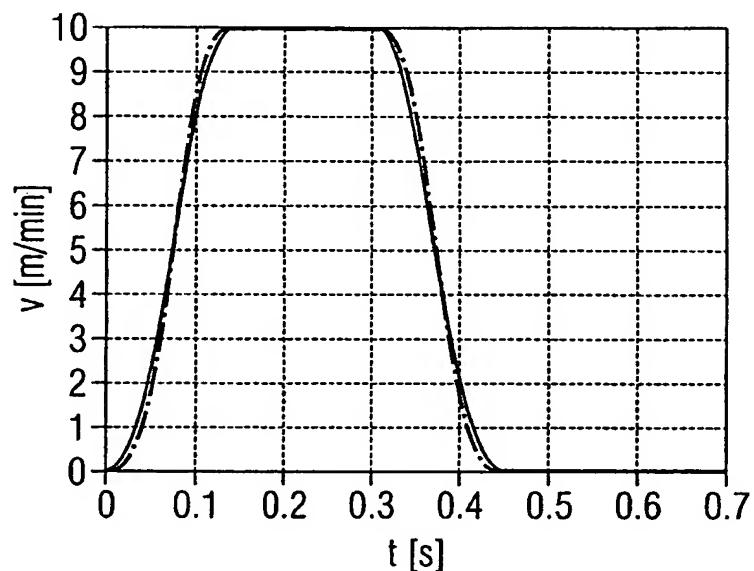
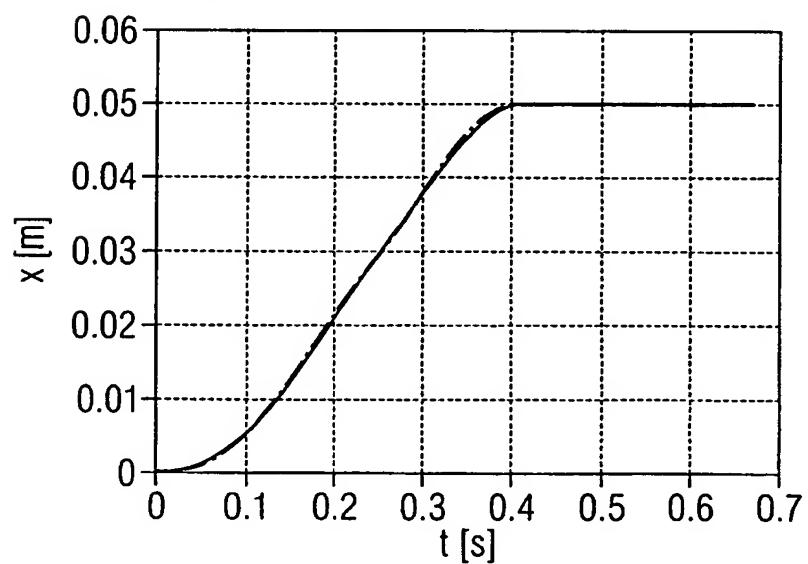
**FIG 9****FIG 10**

FIG 11

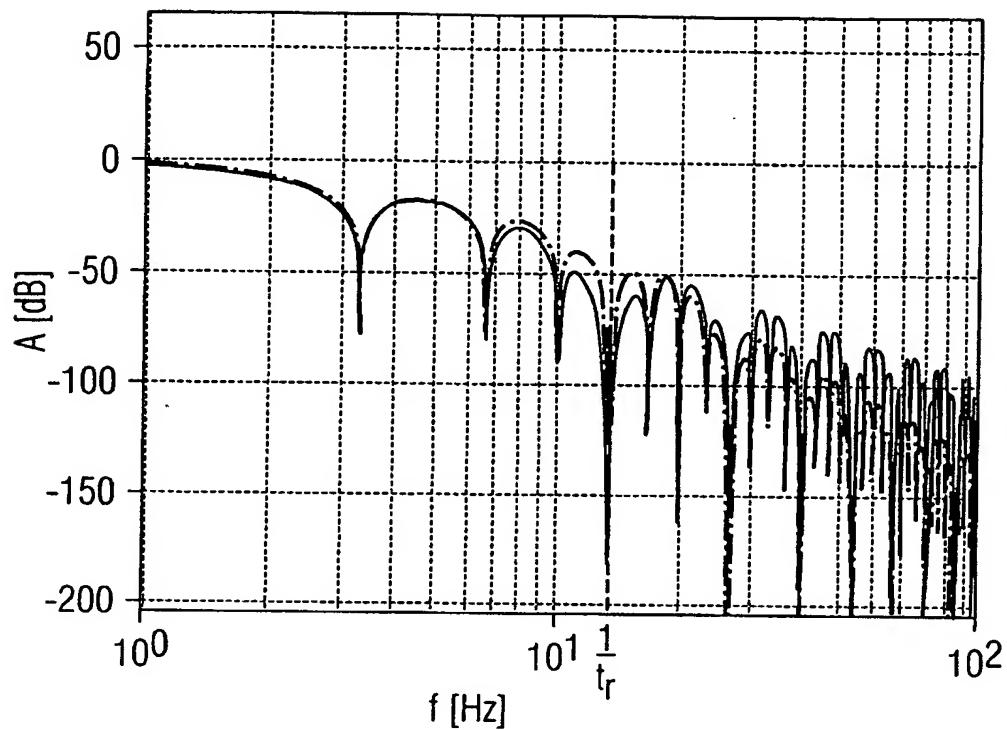


FIG 12

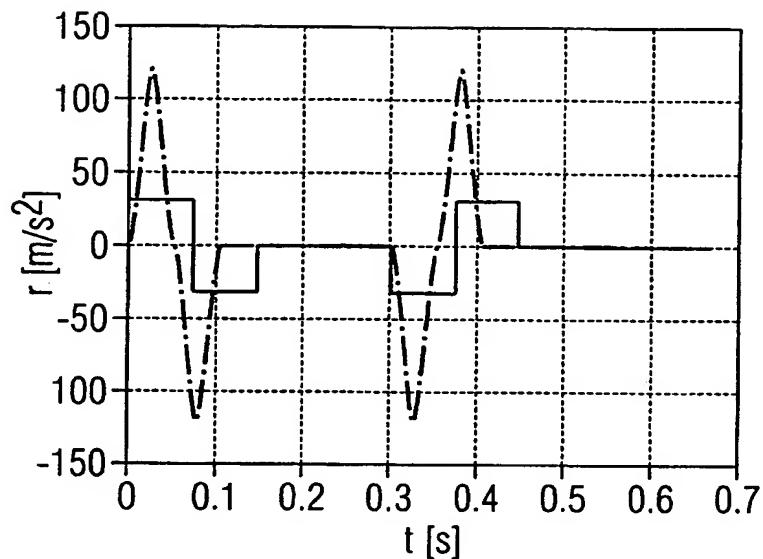


FIG 13

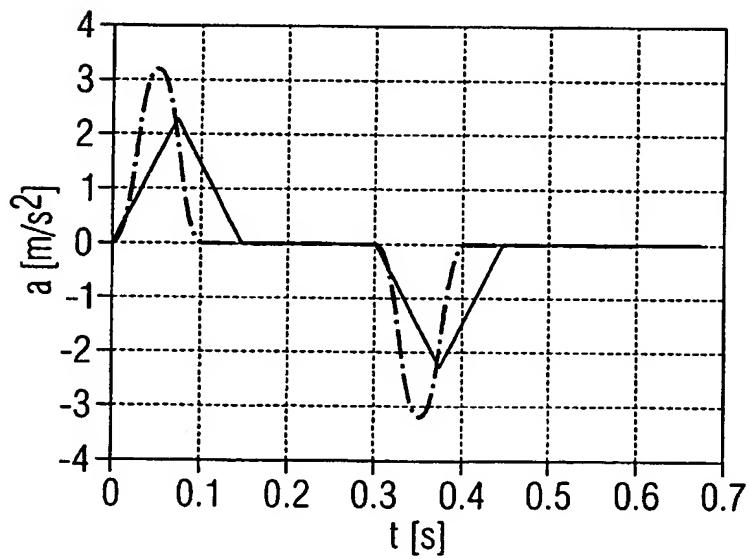


FIG 14

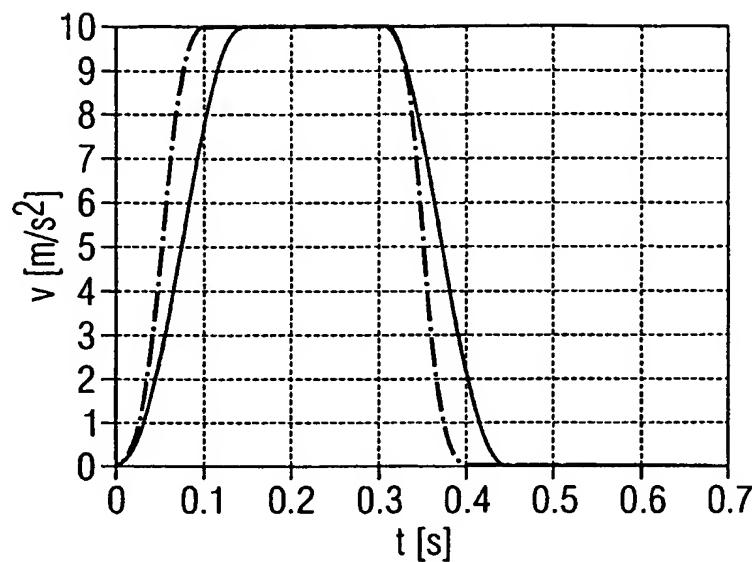


FIG 15

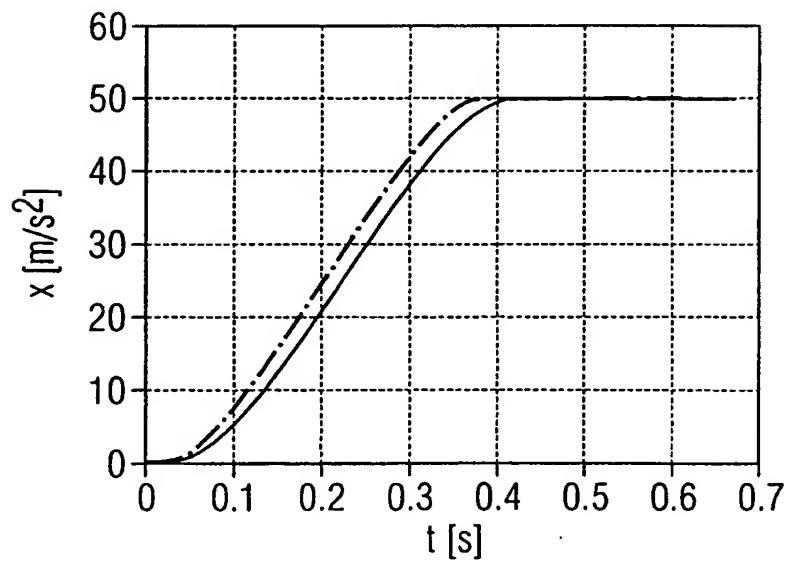


FIG 16

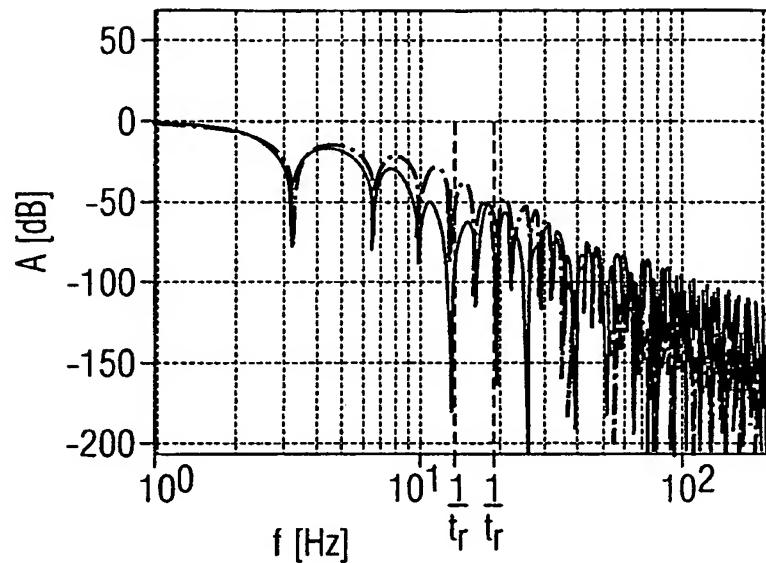


FIG 17

